

# ارزیابی تاثیر میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی با کمک تحلیل شکنندگی

محمد بهمنی<sup>۱</sup>، سید مهدی زهرائی<sup>۳\*</sup>

۱- دانش آموخته دکتری، مهندسی عمران، واحد اراک، دانشگاه آزاد اسلامی، اراک

۲- استادیار، مهندسی عمران، واحد آبادان، دانشگاه آزاد اسلامی، آبادان

۳- استاد، مهندسی عمران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

\* تهران، صندوق پستی ۴۵۶۳-۱۱۱۵۵، [mzahrai@ut.ac.ir](mailto:mzahrai@ut.ac.ir)

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۹، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۱۵)

## چکیده

از منحنی‌های شکنندگی برای نمایش احتمال ایجاد خسارت به ساختمان‌ها در هنگام وقوع زلزله با شدت‌های مختلف استفاده می‌شود. هدف اصلی این مطالعه ارائه یک پروسه طراحی جدید برای بررسی اثربخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فولادی با استفاده از تحلیل شکنندگی لرزه‌ای می‌باشد. علاوه بر این برای تعیین میزان اثربخشی بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی با میراگرهای ویسکوز یک فرمول ساده و کاربردی پیشنهاد می‌گردد. تغییر مکان نسبی بین طبقات به عنوان یک پارامتر موثر در ارزیابی ایمنی ساختمان‌ها پس از وقوع زلزله در این مطالعه به عنوان شاخص خرابی مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای مقایسه احتمال شکست ساختمان‌های با و بدون میراگر، از سه ساختمان شاخص سه، نه و بیست طبقه استفاده می‌شود. همچنین در تحلیل دینامیکی غیرخطی از رکوردهای زلزله که متناظر با سه سطح خطر زلزله می‌باشند، استفاده می‌گردد. مقایسه منحنی‌های شکنندگی ساختمان فولادی کنترل شده با ساختمان‌های بدون میراگر نشان‌دهنده کاهش چشمگیر در احتمال شکست سازه پس از بهسازی با میراگرهای ویسکوز می‌باشد. نتایج تحلیل‌های عددی نشان داد میزان اثربخشی بهسازی در ساختمان‌های شاخص ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۴۵، ۴۸ و ۴۱ درصد می‌باشد و اگرچه بهسازی لرزه‌ای در تمامی ساختمان‌های شاخص منجر به بهبود عملکرد لرزه‌ای شده است، اما میزان کاهش در پاسخ سازه میان مرتبه بیشتر از سایر ساختمان‌ها می‌باشد.

## واژگان کلیدی

میراگرهای ویسکوز، ساختمان‌های فولادی، منحنی‌های شکنندگی، بهسازی لرزه‌ای، جابجایی نسبی بین طبقات

## Evaluation of seismic rehabilitation effectiveness in steel buildings with supplemental viscous dampers using seismic fragility analysis

M. Bahmani, S.M. Zahrai

### Abstract

The fragility curves are used to indicate the probability of damage to buildings during the earthquakes with different intensities. The main objective of this study is to present a new design procedure for exploring the effectiveness of using viscous dampers in the seismic rehabilitation of steel structures using the seismic fragility analysis. In addition, a straightforward formula is presented to determine the effectiveness of seismic rehabilitation of steel structures with viscous dampers. The inter-story drift as one of the effective parameters for assessing the safety of buildings after an earthquake is used in this study as a damage index. To compare the damage probability of buildings with and without damper, three 3, 9 and 20-story benchmark buildings are used. Furthermore, the earthquake records corresponding to three levels of seismic hazard are used for the nonlinear dynamic analysis. Comparison of the fragility curves between the steel structures controlled and the buildings without the damper shows a significant decrease in the damage probability after the rehabilitation with the viscous dampers. The results of numerical analysis showed that although seismic rehabilitation in all benchmark buildings led to the improved seismic performance, the decrease in the response of the 9-story structure is higher compared to the other buildings.

### Keywords

Viscous dampers, Steel buildings, Fragility curves, Seismic rehabilitation, Inter-story drift ratio

قطعیت در مصالح، نحوه توزیع بارها، عدم قطعیت در پارامترهای طراحی سیستم‌های کنترلی و غیره مواجه هستیم [۱۹].

در این مطالعه به منظور ارزیابی اثربخشی استفاده از میراگرها در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فولادی و همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت در بررسی خسارات احتمالی ساختمان‌های بهسازی شده در برابر زلزله‌های آینده، از روش احتمالاتی استفاده می‌شود. در این روش رفتار احتمالاتی ساختمان بهسازی شده توسط منحنی‌های شکنندگی بیان می‌شود که در آن احتمال خسارت ناشی از زمین لرزه به عنوان تابعی از مشخصه‌های حرکت زمین بیان می‌گردد. برای مدل‌های عددی از ساختمان‌های شاخص ۳، ۹ و ۲۰ طبقه که معرف ساختمان‌های کوتاه، میان و بلند مرتبه هستند استفاده می‌شود. همچنین در طراحی میراگرهای ویسکوز، دو دسته رکوردهای حوزه دور و نزدیک در سه سطح خطر زلزله به کار گرفته می‌شوند.

پروژه طراحی پیشنهادی با هدف دستیابی به یک متدولوژی ساده برای بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی و به کارگیری آن توسط مهندسين طراحی حرفه ای ارائه می‌گردد. پروژه طراحی پیشنهادی دارای چند نوآوری و مزیت نسبی در مقایسه با روندهای طراحی موجود می‌باشد. برخی از مهمترین مزیت‌ها عبارتند از:

- ۱- اثر عدم قطعیت در ارزیابی بهسازی لرزه‌ای ساختمان با میراگرهای ویسکوز لحاظ می‌گردد.
- ۲- ارزیابی میزان اثر بخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های شاخص با ارایه یک فرمول نوآورانه پیشنهادی که ضمن استفاده از داده‌های منحنی شکنندگی ساده و کاربردی است، صورت می‌پذیرد.
- ۳- مشخصات میراگرهای ویسکوز بر اساس سطح عملکرد هدف و تنها با استفاده از پرپود ساختمان و جرم هر طبقه تعیین می‌شود.
- ۴) برای ساختمان‌ها با جرم و سختی متفاوت در طبقات، پاسخ‌های سازه دارای دقت کافی و قابل قبولی می‌باشند.
- ۵) نسبت گریز بین طبقات، در طبقات مختلف ساختمان تقریباً مشابه است (توزیع یکنواخت گریز طبقات) زیرا توزیع میراگرهای ویسکوز در ارتفاع ساختمان بر اساس روش توزیع انرژی کرنشی برشی طبقه می‌باشد.

طراحی لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی موجود بر مبنای معیار ایمنی جانی یا آستانه فروریزش می‌باشد اما خسارات گسترده مالی به وقوع پیوسته در زلزله‌های اخیر نمایانگر عدم کفایت این معیارها جهت حفاظت از منابع مالی شده در احداث ساختمان‌ها است. پیامدهای مالی ناشی از زلزله‌های اخیر و اصلاح آیین‌نامه‌های لرزه‌ای نیاز روز افزون سازه‌های ساختمانی موجود را به بهسازی لرزه‌ای جهت بهبود عملکردشان آشکار می‌سازد [۱].

در دو دهه اخیر با توجه به مزیت‌های فراوان میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها، مطالعات متعددی در خصوص جنبه‌های مختلف مهندسی و اقتصادی میراگرهای ویسکوز صورت پذیرفته است. در یک تقسیم بندی کلی، مطالعات انجام شده در سال‌های اخیر را می‌توان به ده بخش اصلی تقسیم بندی نمود.

- ۱- استراتژی‌های طراحی میراگرهای ویسکوز [۲ و ۳].
- ۲- بررسی اثر رفتار غیر خطی میراگرهای ویسکوز در کاهش پاسخ سازه‌ها [۴ و ۵].
- ۳- تعیین مکان و سایز بهینه میراگرهای ویسکوز [۶ و ۷].
- ۴- استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود [۸ و ۹].
- ۵- کمینه کردن هزینه چرخه عمر سازه با استفاده از میراگر ویسکوز [۱۰ و ۱۱].
- ۶- کارهای آزمایشگاهی جهت صحت سنجی روابط طراحی ارایه شده [۱۲ و ۱۳].
- ۷- طراحی لرزه‌ای بر اساس تغییر مکان برای سازه‌های ساختمانی به همراه میراگر ویسکوز [۱۴ و ۱۵].
- ۸- پیکره بندی میراگرهای ویسکوز [۱۶].
- ۹- مقایسه عملکرد میراگر ویسکوز با سایر میراگرهای کنترل غیر فعال [۱۷].
- ۱۰) توسعه فنی میراگرهای ویسکوز [۱۸].

اکثر مطالعات انجام شده در زمینه بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های فولادی با میراگرهای ویسکوز با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی سعی در بهینه سازی طراحی میراگرها داشته‌اند و از اثر عدم قطعیت در تحلیل و طراحی سیستم‌های کنترلی چشم‌پوشی نموده‌اند. لیکن برای طراحی یک سیستم کنترلی، با عدم قطعیت بسیاری از قبیل خطاهای ساخت، عدم



## ۲- اصول پایه میراگرهای ویسکوز

### ۲-۱- نسبت میرایی مکمل تهیه شده توسط میراگرهای ویسکوز خطی

فرمول‌های نسبت میرایی مکمل توسط میراگرهای ویسکوز خطی در فصل نهم FEMA 356 ارائه شده است. این فرمول‌های طراحی یک روش ساده و مناسب برای محاسبه ضریب میرایی میراگرهای ویسکوز خطی متناظر با نسبت میرایی اضافه شده دلخواه می‌باشند. نسبت میرایی ( $\xi$ ) تهیه شده توسط میراگرهای ویسکوز خطی برای یک سیستم یک درجه آزادی که تحت اثر یک بار چرخه‌ای هارمونیک ارتعاش می‌کند عبارت است از:

$$\xi = \frac{W_D}{4\pi W_S} \quad (1)$$

که در آن  $W_D$  انرژی مستهلک شده توسط میراگر در یک چرخه کامل می‌باشد و  $W_S$  حداکثر انرژی کرنشی قاب است. نتایج آزمایشگاهی نشان داده‌اند در صورت افزایش نسبت میرایی یک سازه چند درجه آزادی، مدهای بالاتر پاسخ سازه سرکوب خواهند شد و مود اول سازه مد غالب خواهد بود. در نتیجه غالباً تنها مد اول سیستم‌های چند درجه آزادی در روندهای ساده شده طراحی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بنابراین برای سیستم‌های چند درجه آزادی انرژی مستهلک شده توسط میراگرهای ویسکوز خطی و حداکثر انرژی کرنشی قاب برای مد اول به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$W_D = \sum_j W_{Dj} = \sum_j \pi C_j \left(\frac{2\pi}{T_m}\right) (u_{roof} \varphi_{mr,j} f_j)^2 \quad (2)$$

$$W_S = \frac{2\pi^2}{T_m^2} \sum_i m_i u_{roof}^2 \varphi_{mi}^2 \quad (3)$$

که در آن  $W_{Dj}$  انرژی مستهلک شده توسط میراگر  $j$ ام در یک چرخه کامل،  $C_j$  ضریب میرایی برای میراگر ویسکوز خطی  $j$ ام،  $T_m$  پریود ارتعاش مد اول،  $u_{roof}$  حداکثر تغییر مکان بام سازه،  $\varphi_{mr,j}$  تغییر مکان نسبی مودال در مد اول بین دو سر میراگر  $j$ ام در جهت محور میراگر،  $f_j$  برای حالتی که مهاربند به صورت مورب باشد برابر  $\cos\theta_j$  که در آن  $\theta_j$  زاویه بین محور میراگر و راستای افق می‌باشد.  $m_i$  جرم کف سطح  $i$ ام و  $\varphi_{mi}$  تغییر مکان مودال در مد اول برای سطح طبقه  $i$ ام. با جایگذاری معادله (۲) و (۳) در معادله (۱) نسبت میرایی ( $\xi_m$ ) تهیه شده توسط میراگرهای ویسکوز خطی در مد اول سازه به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\xi_m = \frac{T_m \sum_j C_j \varphi_{mr,j}^2 f_j^2}{4\pi \sum_i m_i \varphi_{mi}^2} \quad (4)$$

### ۲-۲- نسبت میرایی مکمل تهیه شده توسط میراگرهای

#### ویسکوز غیرخطی

انرژی اتلاف شده توسط میراگرهای ویسکوز غیرخطی برای یک سیستم یک درجه آزادی که تحت اثر یک بار چرخه‌ای هارمونیک ارتعاش می‌کند، عبارت است از:

$$W_D = \int F_d du = \int C_N \dot{u}^\alpha du = \lambda C_N \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^\alpha u_0^{\alpha+1} \quad (5)$$

$$\lambda = 2^{2+\alpha} \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha)} \quad (6)$$

که در آن  $u$  تغییر مکان سیستم یک درجه آزادی،  $u_0$  حداکثر مقدار  $u$ ،  $C_N$  ضریب میرایی میراگرهای ویسکوز غیر خطی و  $\Gamma$  تابع گاما می‌باشد. معادله (۵) را برای سیستم‌های چند درجه آزادی می‌توان به صورت زیر بسط داد.

$$W_D = \sum_j W_{D,j} = \sum_j \lambda_j C_{N,j} \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^{\alpha_j} (u_{roof} \varphi_{mr,j} f_j)^{\alpha_j+1} \quad (7)$$

با جایگذاری معادله (۳) و (۷) در معادله (۱) نسبت میرایی ( $\xi_m$ ) تهیه شده توسط میراگرهای ویسکوز غیر خطی در مد اول سازه به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\xi_m = \frac{\sum_j \lambda_j C_{N,j} \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^{\alpha_j-2} u_{roof}^{\alpha_j-1} \varphi_{mr,j}^{\alpha_j+1} f_j^{\alpha_j+1}}{2\pi \sum_i m_i \varphi_{mi}^2} \quad (8)$$

$$\lambda_j = 2^{2+\alpha_j} \frac{\Gamma^2\left(1 + \frac{\alpha_j}{2}\right)}{\Gamma(2 + \alpha_j)} \quad (9)$$

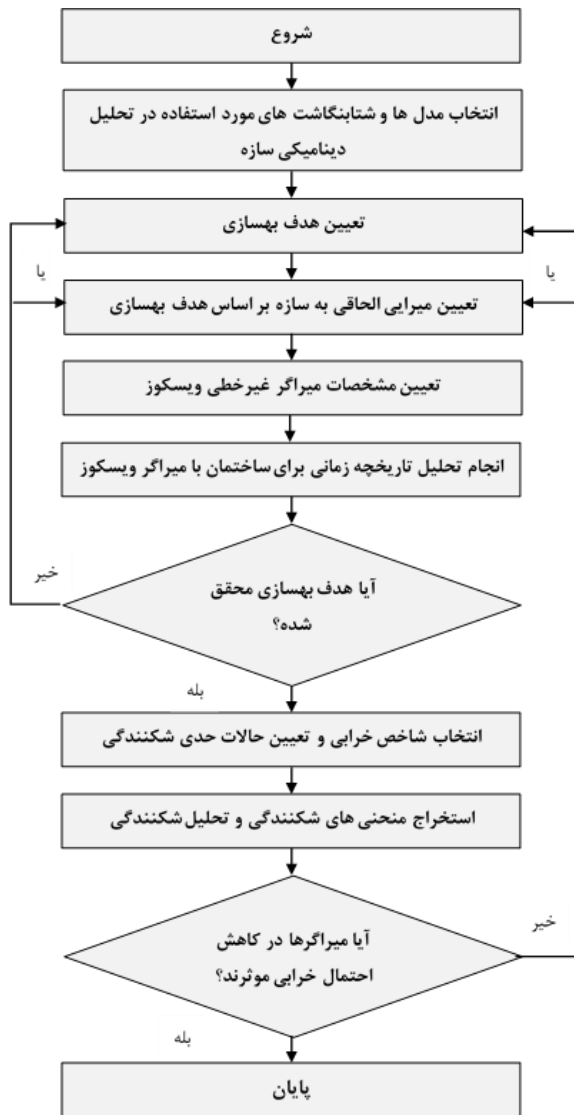
که در آن  $C_{N,j}$  ضریب میرایی برای میراگر ویسکوز غیر خطی  $j$ ام و  $\alpha_j$  توان سرعت میراگر ویسکوز غیر خطی  $j$ ام می‌باشد.

### ۳- اصول پایه منحنی‌های شکنندگی

منحنی شکنندگی بیانگر احتمال تجاوز میزان خسارت ساختمان از میزان مشخص شده، در سطوح مختلف جنبش لرزه‌ای زمین است. از دیدگاه ریاضی شکنندگی ساختمان به صورت احتمال بروز خرابی در ساختمان بر اثر یک زلزله خاص با شدت  $z$  و بر اساس خسارت  $i$  تعریف می‌شود.

$$F_{ij} = \text{prob}[D \geq d_i | IM] \quad (10)$$

در این رابطه،  $F$  تابع شکنندگی،  $IM$  پارامتر اندازه گیری شدت زلزله است. این پارامتر حتی می‌تواند متفاوت باشد، مانند بیشینه شتاب زمین (PGA)، بیشینه سرعت زمین (PGV)، بیشینه تغییر مکان زمین (PGD)، شتاب طیفی ( $S_d$ )، سرعت طیفی ( $S_v$ ) و تغییر مکان طیفی ( $S_d$ ).  $D$  میزان خرابی در سازه بر اثر وقوع



شکل ۱- روند طراحی جامع پیشنهادی برای بهسازی لرزه‌ای با میراگرهای ویسکوز غیرخطی

انجمن مهندسين امريكا با درك اهميت وجود سازه‌هاي شاخص در کنترل سازه‌ها سعی در ایجاد و توسعه آنها کرد. سازه‌های شاخص شامل مشخصات چند سازه، نحوه مدل‌سازی آنها و معیارهای ارزیابی می‌باشند که در اختیار محققین قرار گرفتند تا با در نظر گرفتن سیستم‌های کنترل مورد نظرشان معیارها را برای ساختمان‌های شاخص ارائه شده بررسی کنند. این ساختمان‌های سه، نه و بیست طبقه به عنوان قسمتی از پروژه فولادی SAC برای مناطق لس آنجلس و کالیفرنیا طراحی شده‌اند. هدف از انتخاب این ساختمان‌ها برای مثال‌های طراحی، مهیا کردن یک مبنای شفاف برای ارزیابی روند طراحی جامع پیشنهادی می‌باشد. هر سه ساختمان به صورت قابل توجهی در مشخصات

رخدادهای تصادفی (برای مثال تغییر مکان نسبی طبقات) و  $d_i$  میزان خرابی مشخصی از سازه است که به آن خرابی حالت نام گفته می‌شود. این خرابی به صورت کیفی بیان و از نظر کمی با شاخص‌های متفاوتی مانند شکل پذیری سازه یا تغییر مکان نسبی اندازه‌گیری می‌شود. سه روش برای برآورد منحنی‌های شکنندگی وجود دارد [۲۰]:

- ۱- روش قضاوت مهندسی که در صورت عدم وجود اطلاعات خرابی از نظر کارشناسی متخصصان برای تعیین میزان خرابی سازه‌ها استفاده می‌شود.
  - ۲- روش تجربی که از اطلاعات خرابی به دست آمده از یک زلزله واقعی برای تعیین منحنی‌های شکنندگی استفاده می‌شود.
  - ۳- روش تحلیلی که برای برآورد منحنی شکنندگی از نتایج تحلیل‌های عددی استفاده می‌شود.
- در این مطالعه از روش سوم برای ترسیم منحنی‌های شکنندگی استفاده می‌شود.

#### ۴- روند طراحی جامع پیشنهادی

در دو دهه‌ی اخیر روندهای طراحی متفاوتی توسط محققین و آیین‌نامه‌ها جهت طراحی ساختمان‌ها به همراه میراگر ویسکوز ارایه شده است که غالباً بدون بررسی عدم قطعیت در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها بوده است و معمولاً این پروسه‌های طراحی شامل یک فرآیند سعی و خطا برای رسیدن به طرح نهایی می‌باشند. در این مقاله با اصلاح روندهای طراحی موجود و اضافه نمودن تحلیل شکنندگی جهت ارزیابی اثربخشی بهسازی لرزه ساختمان‌های فولادی با میراگرهای ویسکوز الحاقی، یک روند طراحی جامع جدید برای بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فولادی موجود به کمک میراگر ویسکوز غیر خطی در شکل (۱) معرفی شده است.

#### ۴-۱- گام اول: انتخاب مدل‌ها و شتابنگاشت‌های مورد استفاده در تحلیل دینامیکی سازه

برای ارزیابی روند طراحی جامع پیشنهاد شده در این تحقیق، از سه ساختمان شاخص ارایه شده توسط Ohtori و همکارانش استفاده می‌نماییم [۲۱]. محققین حوزه کنترل سازه‌ها با در نظر گرفتن سازه‌های مختلف و معیارهای متفاوت سعی در نشان دادن اثر روش یا وسیله کنترل خاصی داشتند، اما با توجه به فقدان اصول مشترک در تحقیقات امکان مقایسه روش‌ها و یا وسایل کنترلی آنها با یکدیگر موجود نبود. کمیته کنترل سازه

توسط FEMA 227 استفاده می‌نمایم. همان گونه که در جدول (۱) مشاهده می‌شود از حداکثر درصد نسبت گریز طبقه که از پارامترهای موثر پاسخ ساختمان است به عنوان شاخصی جهت تعیین سطح عملکرد سازه استفاده شده است. حالت حدی بهره برداری بی وقفه به این صورت تعریف می‌شود که حداکثر درصد گریز طبقه  $\Delta$  برای کل ساختمان کوچکتر از ۰/۷ درصد باشد. برای سطح عملکرد ایمنی جانی به این صورت تعریف می‌شود که  $\Delta < ۰.۲/۵$  و برای سطح عملکرد آستانه فرو ریزش  $\Delta < ۰.۵/۵$  می‌باشد.

جدول ۱- حالات حدی و سطوح عملکرد متناظر

حالت حدی	شرح خرابی	درصد گریز حداکثر	سطوح عملکرد
۱	بدون خرابی	$\Delta < ۰.۲$	بهره برداری بی وقفه
۲	خیلی کم	$۰.۲ < \Delta < ۰.۴$	
۳	کم	$۰.۴ < \Delta < ۰.۷$	
۴	متوسط	$۰.۷ < \Delta < ۱.۵$	ایمنی جانی
	شدید	$۱.۵ < \Delta < ۲.۵$	
۶	خیلی شدید	$۲.۵ < \Delta < ۵.۰$	آستانه فروریزش
۷	تخریب کامل	$\Delta < ۵.۰$	-

#### ۴-۳- گام سوم: تعیین میرایی الحاقی به سازه بر اساس هدف بهسازی

تاثیر نسبت میرایی سازه در کاهش پاسخ لرزه‌ای در نواحی شتاب ثابت، سرعت ثابت و تغییر مکان ثابت در طیف پاسخ کاملاً یکسان نمی‌باشد ولی با تقریب قابل قبولی می‌توان تاثیر نسبت میرایی بر کاهش پاسخ لرزه‌ای در طول محدوده پریودی ساختمان‌های رایج را ثابت فرض نمود. در این تحقیق ضریب کاهش در پاسخ لرزه‌ای ساختمان  $\eta_{\Delta}(\xi)$  از تقسیم ماکزیمم گریز طبقه برای حالت بهسازی شده با میراگر ویسکوز بر ماکزیمم گریز طبقه برای ساختمان بدون میراگر (با میرایی ذاتی  $\xi = ۰.۰۵$ ) به دست می‌آید. در این تحقیق برای بیان رابطه بین نسبت میرایی ساختمان پس از بهسازی با میزان کاهش پاسخ لرزه‌ای متناظر با آن از رابطه پیشنهادی توسط Bommer و همکارانش استفاده می‌شود [۲۳]. درصد میرایی قید شده در ستون پنجم جداول (۲) تا (۴) از این رابطه تعیین می‌شود.

$$\eta_{\Delta}(\xi) = \frac{\Delta_{max}(\xi_m + \xi)}{\Delta_{max}(\xi = 0.05)} \quad (11)$$

دینامیکی و ظرفیت مقاومت جانبی با هم متفاوت هستند به نحوی که یک مبنای گسترده را برای مقایسه‌ی راهبردهای مختلف کنترل سازه مهیا می‌سازند. سازه‌های این ساختمان‌ها مطابق با الزامات آیین‌نامه‌های محلی و با در نظر گرفتن بارهای ثقلی، باد و زلزله طراحی شده‌اند و نشان دهنده ساختمان‌ها کوتاه، میان و بلند مرتبه هستند. سیستم سازه‌ای برای هر سه ساختمان شامل قاب‌های مقاوم خمشی محیطی و قاب‌های مفصلی داخلی با استفاده از اتصال برشی می‌باشد. شرح کامل مشخصات سازه‌ها شامل ابعاد، اندازه اعضا، بارگذاری و نوع مصالح استفاده شده در مطالعه انجام شده توسط Ohtori و همکارانش موجود می‌باشد.

رویکرد رایج در تحلیل لرزه‌ای سازه‌های ساختمانی استفاده از طیف‌های پاسخ آیین‌نامه‌ها به دلیل سهولت در استفاده از آنها می‌باشد. اما در صورت نیاز به یک طراحی دقیق‌تر استفاده از رکوردهای زلزله طبیعی مناسب‌تر می‌باشد. در این تحقیق با توجه به استفاده از ساختمان‌های شاخص برای مدل‌های طراحی، برای ارزیابی روند جامع پیشنهادی از دو رکورد حوزه دور و دو رکورد حوزه نزدیک پیشنهاد شده توسط Ohtori و همکارانش جهت تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است. بنا به پیشنهاد آنها از مولفه‌های شمال - جنوب زلزله‌های السترو، هاچینوهه، نورث‌ریج و کوبه جهت تحلیل تاریخچه زمانی استفاده شده است.

علاوه بر این جهت ارزیابی روند پیشنهادی برای مناطق مختلف با لرزه خیزی متفاوت و مقایسه‌ی نتایج روند ارایه شده با پاسخ مسئله شاخص، سطوح مختلف رکوردهای هر زلزله شامل: ۰/۵، ۱ و ۱/۵ برابر زلزله السترو و هاچینوهه و ۰/۵ و ۱ برابر زلزله‌های نورث‌ریج و کوبه مورد بررسی قرار گرفته است. از طرفی Somerville و همکارانش سه مجموعه شتابنگاشت، که هر مجموعه شامل ۲۰ رکورد می‌باشد برای پروژه SAC در نظر گرفته‌اند. این شتابنگاشت‌ها متناظر با احتمال وقوع زلزله‌ی ۲، ۱۰ و ۵۰ درصد در ۵۰ سال می‌باشند. در این مطالعه از دو مجموعه با احتمال وقوع ۲ و ۱۰ درصد در ۵۰ سال برای استخراج منحنی‌های شکنندگی استفاده شده است [۲۲].

#### ۴-۲- گام دوم: تعیین هدف بهسازی

هدف بهسازی (سطح عملکرد سازه پس از بهسازی) بر مبنای فصل مشترک خواسته‌های مالک و ضوابط لرزه‌ای مورد پذیرش آیین‌نامه‌ها تعیین می‌شود. در این تحقیق برای بیان سطوح عملکرد سازه مطابق جدول (۱) از حالات حدی بیان شده



با جایگذاری معادله (۱۷) در معادله (۱۵) ضریب میرایی هر طبقه به صورت زیر خواهد بود:

$$C_j = \frac{4\pi\xi_m\varphi_{mj}S_j(\sum_i m_i\varphi_i^2)}{T_m \sum_i [\varphi_{mi}S_i(f_j\varphi_{mi})^2]} \quad (18)$$

با فرض اینکه میراگر ویسکوز غیر خطی در تحریک‌های لرزه‌ای یکسان، عملکردی مشابه با میراگرهای ویسکوز خطی دارد، برای تعیین ضریب میرایی میراگر ویسکوز غیر خطی با استفاده از رویکرد انرژی، فرض می‌کنیم میانگین انرژی مستهلک شده توسط میراگر ویسکوز غیر خطی و خطی در یک سیستم SDOF تحت اثر ارتعاش هارمونیک است یکسان می‌باشد.

$$\frac{1}{u_0} \int_0^{u_0} W_{DN} du = \frac{1}{u_0} \int_0^{u_0} W_{DL} du \quad (19)$$

$$\frac{1}{u_0} \int_0^{u_0} \lambda C_N \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^\alpha u^{\alpha+1} du = \quad (20)$$

$$\frac{1}{u_0} \int_0^{u_0} \pi C_N \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^\alpha u^2 du$$

که در آن  $W_{DN}$  انرژی مستهلک شده توسط میراگر ویسکوز غیر خطی در یک چرخه ارتعاش هارمونیک و  $W_{DL}$  انرژی مستهلک شده توسط میراگر ویسکوز خطی در یک چرخه ارتعاش هارمونیک می‌باشد. سمت چپ معادله (۱۹) میانگین انرژی مستهلک شده توسط میراگرهای ویسکوز غیر خطی و سمت راست این معادله میانگین انرژی مستهلک شده توسط میراگرهای ویسکوز خطی می‌باشد. با یکپارچه سازی معادله (۲۰) خواهیم داشت:

$$C = \frac{3\lambda C_N \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^{\alpha-1} u_0^{\alpha-1}}{\pi(2+\alpha)} \quad (21)$$

این معادله برای سیستم‌های یک درجه آزادی می‌باشد و برای سیستم‌های چند درجه آزادی با جایگذاری  $u_{roof}\varphi_{mr,j}f_j$  با  $u$  خواهیم داشت:

$$C = \frac{3\lambda C_{N,j} \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^{\alpha_j-1} (u_{roof}\varphi_{mr,j}f_j)^{\alpha_j-1}}{\pi(2+\alpha_j)} \quad (22)$$

بنابراین نسبت میرایی مهیا شده توسط میراگر ویسکوز غیر خطی می‌تواند به صورت زیر با جایگذاری معادله (۲۲) در معادله (۴) به دست آید.

$$\xi_m = \frac{3 \sum_j \lambda_j C_{N,j} \left(\frac{2\pi}{T_m}\right)^{\alpha_j-2} u_{roof}^{\alpha_j-1} \varphi_{mr,j} f_j^{\alpha_j+1}}{2\pi \sum_i m_i \varphi_{mi}^2} \quad (23)$$

۴-۵- گام پنجم: انجام تحلیل تاریخچه زمانی برای ساختمان همراه با میراگر ویسکوز غیر خطی

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi + \xi_m}} \quad (12)$$

۴-۴- گام چهارم: تعیین مشخصات میراگر غیر خطی ویسکوز برای مشخص نمودن ضریب میرایی هر طبقه و تعیین مشخصات میراگر ویسکوز *Silvestri* و همکارانش با فرض برابر بودن وزن و سختی جانبی تمامی طبقات، روش ساده شده‌ای بر مبنای توزیع یکنواخت میراگرها در ارتفاع ساختمان ارایه داده‌اند. در این تحقیق از روش بهینه‌تر توزیع میرایی بر مبنای انرژی کرنشی برشی طبقه (بدون در نظر گرفتن فرض برابر بودن جرم و سختی طبقات که باعث تقریب در پاسخ می‌شود) استفاده شده است. در روش توزیع یکنواخت، میرایی در طبقات مختلف سازه با ماکزیمم نیروی میرایی ایجاد شده هنگام زلزله در طبقات ساختمان متناسب نمی‌باشد. این موضوع باعث می‌شود میزان استهلاک انرژی ورودی زلزله در مقایسه با سایر روش‌ها توزیع میرایی کاهش یابد. استفاده از روش توزیع میرایی بر مبنای انرژی کرنشی برشی طبقه به عنوان یک روش غیر تکرار شونده توزیع میرایی در ساختمان نسبت به سایر روش‌ها منطقی‌تر است زیرا در این روش در محلی از ساختمان که انرژی کرنشی برشی طبقه بیشتر است ضریب میرایی بیشتری اختصاص داده می‌شود و در نتیجه مشارکت میراگرها بسیار موثرتر خواهد بود.

برای ساختمان برشی انرژی کرنشی برشی طبقه متناسب با  $S_j\varphi_{mj}$  خواهد بود، بنابراین ضریب میرایی در هر طبقه از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$C_j = qS_j\varphi_{mj} \quad (13)$$

که در آن  $q$  نسبت تناسب و  $S_j = \sum_{i=j}^{roof} m_i\varphi_i$  می‌باشد، بنابراین ضریب میرایی کل ساختمان برابر است با:

$$\sum_i C_i = q \sum_i \varphi_{mi} S_i \quad (14)$$

با استفاده از معادله‌های (۱۳) و (۱۴) ضریب میرایی در هر طبقه به صورت زیر به دست می‌آید:

$$C_j = \frac{\varphi_{mj}S_j}{\sum_i \varphi_{mi} S_i} \sum_i C_i \quad (15)$$

با جایگذاری معادله (۱۵) در معادله (۴):

$$\xi_m = \frac{T_m \sum_j [\varphi_{mj}S_j(\sum_i C_i)(f_j\varphi_{mj})^2]}{4\pi(\sum_i m_i\varphi_i^2)(\sum_i \varphi_{mi}S_i)} \quad (16)$$

بنابراین برای میرایی کل سازه داریم:

$$\sum_i C_i = \frac{4\pi\xi_m(\sum_i m_i\varphi_i^2)(\sum_i \varphi_{mi}S_i)}{T_m \sum_i [\varphi_{mi}S_i(f_j\varphi_{mi})^2]} \quad (17)$$



می‌شود. سپس تحلیل دینامیکی فزاینده برای هریک از شتابنگاشت‌ها انجام می‌شود. برای تولید منحنی شکنندگی باید یک توزیع احتمال برای پارامترهای تقاضای مهندسی که از تحلیل‌های دینامیکی غیرخطی فزاینده به دست می‌آیند در نظر گرفت [۲۷]. در این مطالعه از توزیع لوگ نرمال که جز توزیع‌های احتمالاتی رایج در این زمینه می‌باشد، استفاده می‌شود. هر یک از سازه‌های شاخص تحت ۴۰ رکورد زلزله از ۰/۱g تا ۲g تحلیل می‌گردد و سپس احتمال شکست سازه در هر سطح از شدت زلزله محاسبه می‌شود. هنگامی که ظرفیت سازه‌ای و تقاضای لرزه‌ای دو متغیری باشند که از توزیع نرمال یا لگاریتم نرمال پیروی کنند، با استفاده از قاعده حد مرکزی می‌توان نشان داد که عملکرد مرکب حاصل شده، توزیع لگاریتم نرمال خواهد داشت. بنابراین تابع شکنندگی را می‌توان به صورت تابع توزیع تجمعی لگاریتمی نرمال مطابق رابطه (۲۴) نوشت:

$$P(D \geq d_i) = 1 - \varphi \left[ \frac{1}{\beta_{TOT}} \ln \left( \frac{S_d}{S_c} \right) \right] \quad (24)$$

در رابطه‌ی بالا  $\varphi$  تابع توزیع تجمعی لگاریتم نرمال،  $P$  احتمال رسیدن یا تجاوز از حالت خرابی  $d_i$  (در این تحقیق حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقات)،  $\beta_{TOT}$  انحراف معیار لگاریتم نرمال کل برای هر حالت خرابی ( $d_i$ ) است و مطابق با رابطه (۲۵) از جذر مجموع مربعات چهار منبع عدم قطعیت حاصل می‌شود:

$$\beta_{TOT} = \sqrt{\beta_{RTR}^2 + \beta_{DR}^2 + \beta_{TD}^2 + \beta_{MDL}^2} \quad (25)$$

که در این رابطه  $\beta_{RTR}$  مربوط به عدم قطعیت ناشی از تغییرات رکورد به رکورد است،  $\beta_{DR}$  مربوط به عدم قطعیت ناشی از الزامات طراحی است،  $\beta_{TD}$  مربوط به عدم قطعیت ناشی از داده‌های تست است و  $\beta_{MDL}$  مربوط به عدم قطعیت ناشی از مدل سازی است.  $\beta_{RTR}$  با استفاده از نتایج تحلیل دینامیکی فزاینده برای یک سطح خرابی خاص تعیین می‌شود، سایر پارامترهای انحراف استاندارد لگاریتم نرمال شامل  $\beta_{DR}$ ،  $\beta_{TD}$  و  $\beta_{MDL}$  به ترتیب برابر با ۰/۳۵، ۰/۳۵ و ۰/۲ فرض می‌شوند.  $S_c$  مقدار حالت حدی می‌باشد که در جدول (۱) برای حالت‌های مختلف خرابی ارایه شده است و  $S_d$  متوسط مقدار نیاز لرزه‌ای، از رابطه (۲۶) بدست می‌آید.

$$\ln(S_d) = a \ln(PGA) + b \quad (26)$$

در این رابطه مقادیر  $a$  و  $b$  ضرایب رگرسیونی هستند که از طریق تحلیل رگرسیون لگاریتمی، حداکثر تغییر مکان نسبی بین طبقه‌ای، در مقابل PGAهای مختلف به دست می‌آیند.

با توجه به افزودن میراگرهای ویسکوز غیر خطی به سازه، برای انجام یک طراحی عملی نیازمند تحلیل تاریخچه زمانی برای بررسی رفتار سازه به همراه میراگر ویسکوز غیر خطی هستیم. دو هدف اصلی از انجام تحلیل تاریخچه زمانی در این مرحله عبارتند از:

- ۱- ارزیابی عملکرد سازه به همراه میراگر ویسکوز غیر خطی و مقایسه آن با هدف بهسازی انتخاب شده در گام دوم
- ۲- ارزیابی میرایی مهیا شده توسط میراگر ویسکوز غیر خطی و مقایسه آن با میرایی هدف بیان شده در گام سوم در صورت عدم ارضا هدف عملکردی سازه، نیاز به تجدید نظر در اجرای گام‌های ۲ و ۳ می‌باشد.

#### ۴-۶- گام ششم: انتخاب شاخص خرابی و تعیین حالات حدی شکنندگی

در مطالعات انجام شده توسط سایر محققین از پارامترهای متفاوتی به عنوان شاخص خرابی استفاده شده است. به عنوان مثال می‌توان به استفاده از نسبت شکل پذیری توسط Shinozuka و همکارانش [۲۴]، تغییر مکان نسبی طبقات توسط Hirata و Dimova [۲۵] و شاخص خرابی Park و Ang توسط Karim و Yamazaki [۲۶] اشاره نمود. تعیین شاخص خرابی (شاخص شکنندگی) یکی از عوامل مهم در ترسیم منحنی‌های شکنندگی می‌باشد یکی از بهترین شاخص‌هایی که به دلیل معنی فیزیکی آن می‌تواند به خوبی بیانگر میزان خرابی ساختمان‌ها باشد، نسبت گریز بین طبقات است. بر همین اساس در این مطالعه برای تعیین حالات حدی ساختمان از نسبت گریز بین طبقات به عنوان شاخص خرابی استفاده شده است [۲۰].

در آیین‌نامه‌های مختلف آسیب پذیری ساختمان‌ها در سطوح مختلف از عدم خرابی تا فروریختگی کامل با استفاده از شاخص خرابی تعریف می‌شود. در این تحقیق با استفاده از FEMA 356 از سه حالت حدی بر مبنای نسبت گریز بین طبقات استفاده شده است. همانگونه که در جدول (۱) نشان داده شده این حالات حدی عبارتند از: استفاده بی وقفه‌ای (IO)، ایمنی جانی (LS) و آستانه فروریزش (CP).

#### ۴-۷- گام هفتم: استخراج منحنی‌های شکنندگی و تحلیل شکنندگی ساختمان‌ها

در این مطالعه برای تحلیل سازه، از تحلیل دینامیکی فزاینده استفاده می‌شود. به این صورت که حداکثر شتاب زلزله (PGA) اعمالی به سازه از ۰/۱g تا فروریزش با گام‌های ۰/۲g مقیاس

ده رکورد زلزله ( ۳/۳۴ درصد می‌باشد که ۸/۷ درصد با هدف تعیین شده اختلاف دارد. از طرفی کمترین میزان کاهش در پاسخ سازه مربوط به رکوردهای (1.5) Hachinohe, (1) Northridge و (1) Kobe می‌باشد و بیشترین کاهش در پاسخ زلزله مربوط به چهار رکورد با ضریب ۰/۵ است. بنابراین می‌توان بیان نمود که روند طراحی جامع در ساختمان‌های بلند برای زلزله‌های با شدت کم و متوسط عملکرد مناسب‌تری در کاهش ماکزیمم پاسخ سازه به نسبت زلزله‌های شدید دارد.

برای ساختمان ۹ طبقه میزان کاهش حداکثر نسبت گریز بین طبقات (میانگین ده رکورد زلزله) ۴۳/۹ درصد می‌باشد که ۰/۹ درصد با هدف تعیین شده اختلاف دارد. از طرفی کمترین میزان کاهش در پاسخ سازه مربوط به رکوردهای (1.5) Hachinohe و (1) Northridge می‌باشد و بیشترین کاهش در پاسخ زلزله مربوط به چهار رکورد با ضریب ۰/۵ همچنین و (1) Kobe و (1,1.5) El Centro است. بنابراین می‌توان بیان نمود که روند طراحی جامع در ساختمان‌های میان مرتبه برای زلزله‌های با شدت متوسط عملکرد مناسب‌تری در کاهش ماکزیمم پاسخ سازه به نسبت زلزله‌های شدید دارد. برای ساختمان ۳ طبقه میزان کاهش حداکثر نسبت گریز بین طبقات (میانگین ده رکورد زلزله) ۳۵/۶ درصد می‌باشد که ۷/۴ درصد با هدف تعیین شده اختلاف دارد. از طرفی کمترین میزان کاهش در پاسخ سازه مربوط به رکوردهای (0.5,1,1.5) Hachinohe می‌باشد و بیشترین کاهش در پاسخ زلزله مربوط به سه رکورد با ضریب ۰/۵ همچنین و (1) Kobe و (1) El Centro است. بنابراین می‌توان بیان نمود که روند طراحی جامع در ساختمان‌های کوتاه مرتبه برای زلزله‌های با شدت متوسط عملکرد مناسب‌تری در کاهش ماکزیمم پاسخ سازه به نسبت زلزله‌های شدید دارد.

با توجه به اینکه در تحقیق انجام شده توسط Ohtori و همکارانش نتایج حاصل از کنترل سازه تنها برای ساختمان ۲۰ طبقه ارائه شده است در این بخش به مقایسه‌ی نتایج حاصل از روش طراحی جامع با استراتژی کنترل خطی که توسط Ohtori و همکارانش به عنوان نمونه برای ساختمان ۲۰ طبقه انجام شده، می‌پردازیم. در شکل (۳) حداکثر نسبت گریز بین طبقات برای هر چهار زلزله با ضریب ۱ نمایش داده شده است. همان گونه که در شکل مشخص می‌باشد برای هر چهار رکورد زلزله، بیشترین نسبت گریز بین طبقات سازه‌ی کنترل نشده در بام رخ داده است. روش طراحی جامع پیشنهادی به خوبی قادر به کنترل پاسخ در بام سازه بوده است. همچنین با بررسی شکل (۳) مشخص می‌شود که روند طراحی جامع پیشنهادی علاوه بر بام

۴-۸- گام هشتم: ارزیابی اثر بخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های شاخص

برای ارزیابی اثر بخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های شاخص، با استفاده از خروجی مرحله‌ی پنجم و هفتم روند طراحی جامع، رابطه ساده و کاربردی زیر پیشنهاد می‌گردد:

$$EFF = \left[ 0.5 \frac{\Delta_{Before}^{max} - \Delta_{After}^{max}}{\Delta_{Before}^{max} - \Delta_{LS_1}} + 0.5 \times \frac{((P_{Before}^{LS} + P_{Before}^{CP}) - (P_{After}^{LS} + P_{After}^{CP}))/2}{P_{Before}^{CP}} \right] \times 100 \quad (27)$$

که در آن  $EFF$  درصد اثربخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها،  $\Delta_{Before}^{max}$  حداکثر نسبت گریز برای حالت قبل از بهسازی می‌باشد،  $\Delta_{After}^{max}$  حداکثر نسبت گریز برای حالت بعد از بهسازی می‌باشد،  $\Delta_{LS_1}$  حداکثر نسبت گریز ساختمان در حالت حدی اول می‌باشد،  $P_{Before}^{LS}$  احتمال تجاوز از حالت حدی دوم برای ساختمان بدون میراگر،  $P_{Before}^{CP}$  احتمال تجاوز از حالت حدی سوم برای ساختمان بدون میراگر،  $P_{After}^{LS}$  احتمال تجاوز از حالت حدی دوم برای ساختمان با میراگر و  $P_{After}^{CP}$  احتمال تجاوز از حالت حدی سوم برای ساختمان با میراگر می‌باشد. مزیت عمده رابطه پیشنهادی استفاده از داده‌های روند طراحی جامع برای محاسبه اثربخشی استفاده از میراگرها در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌ها و احتراز از پیچیدگی در محاسبات می‌باشد. مقدار  $EFF$  عددی بین ۰ تا ۱۰۰ می‌باشد.

۲- پیاده سازی روش طراحی جامع برای ساختمان‌های شاخص

در این مطالعه تنها نتایج مهم اجرای روش طراحی جامع برای ساختمان‌های شاخص ارائه و تفسیر می‌شود. شرح کامل پیاده سازی گام به گام فرآیند طراحی جامع در فاز بعدی تحقیق مورد بررسی قرار خواهد گرفت. بر اساس نتایج تحلیل تاریخچه زمانی در ساختمان‌های بدون میراگر تحت اثر شدت‌های مختلف زلزله (۰/۵، ۱ و ۱/۵)، هدف بهسازی کاهش ۴۳٪ در پاسخ ساختمان‌های شاخص در نظر گرفته شد. نتایج طراحی میراگرهای ویسکوز غیر خطی در جدول (۲) تا (۴) و مقایسه بین شاخص خرابی قبل و بعد از بهسازی در شکل (۲) ارائه شده است.

همان گونه که در شکل (۲) برای ساختمان ۲۰ طبقه مشاهده می‌شود میزان کاهش حداکثر نسبت گریز بین طبقات ( میانگین



جدول ۲- پارامترهای طراحی میراگر ویسکوز غیرخطی در ساختمان ۲۰ طبقه

$C_{nd}$ (kN.s <sup><math>\alpha</math></sup> /m <sup><math>\alpha</math></sup> )	$C_{ni}$ (kN.s <sup><math>\alpha</math></sup> /m <sup><math>\alpha</math></sup> )	$C_i$ (kN.s/m)	$\xi_m$ (%)	$\alpha$	گریز مودال، $\varphi_{mi}$	جابجایی مودال، $\varphi_i$	تراز طبقه
۴۲۹۹	۸۵۹۸	۵۱۳۲۸	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۵۵	۰/۰۵۵	۱
۲۹۳۶	۵۸۷۱	۳۸۹۱۲	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۴۲	۰/۰۹۷	۲
۲۶۶۸	۵۳۳۶	۳۶۵۹۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۴۰	۰/۱۳۷	۳
۲۶۲۰	۵۲۳۹	۳۵۹۳۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۴۰	۰/۱۷۷	۴
۲۵۵۸	۵۱۱۵	۳۵۰۷۸	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۴۰	۰/۲۱۷	۵
۲۲۷۴	۴۵۴۸	۳۲۳۳۰	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۳۸	۰/۲۵۵	۶
۲۱۹۲	۴۳۸۴	۳۱۱۶۳	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۳۸	۰/۲۹۳	۷
۱۹۱۳	۳۸۲۷	۲۸۲۵۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۳۶	۰/۳۲۹	۸
۱۶۴۹	۳۲۹۷	۲۵۳۳۴	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۳۴	۰/۳۶۳	۹
۱۴۰۰	۲۸۰۰	۲۲۴۴۴	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۳۲	۰/۳۹۵	۱۰
۱۳۰۵	۲۶۱۰	۲۰۹۲۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۳۲	۰/۴۲۷	۱۱
۱۰۷۷	۲۱۵۴	۱۸۰۷۰	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۳۰	۰/۴۵۷	۱۲
۹۲۴	۱۸۴۸	۱۵۸۷۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۲۹	۰/۴۸۶	۱۳
۷۳۱	۱۴۶۱	۱۳۱۹۵	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۲۷	۰/۵۱۳	۱۴
۵۶۰	۱۱۲۰	۱۰۶۷۲	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۲۵	۰/۵۳۸	۱۵
۳۸۲	۷۶۴	۷۹۶۵	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۲۲	۰/۵۶۰	۱۶
۲۶۴	۵۲۹	۵۸۹۲	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۲۰	۰/۵۸۰	۱۷
۱۵۳	۳۰۶	۳۸۲۰	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۱۷	۰/۵۹۷	۱۸
۷۵	۱۵۰	۲۱۳۹	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۱۴	۰/۶۱۱	۱۹
۲۲	۴۴	۷۹۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۱۰	۰/۶۲۱	۲۰

جدول ۳- پارامترهای طراحی میراگر ویسکوز غیرخطی در ساختمان ۹ طبقه

$C_{nd}$ (MN.s <sup><math>\alpha</math></sup> /m <sup><math>\alpha</math></sup> )	$C_{ni}$ (MN.s <sup><math>\alpha</math></sup> /m <sup><math>\alpha</math></sup> )	$C_i$ (MN.s/m)	$\xi_m$ (%)	$\alpha$	گریز مودال، $\varphi_{mi}$	جابجایی مودال، $\varphi_i$	تراز طبقه
۲/۰۴	۴/۰۸	۴۹/۳۶	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۱۱۳	۰/۱۱۳	۱
۱/۲۰	۲/۴۱	۳۴/۷۵	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۸۲	۰/۱۹۵	۲
۱/۱۵	۲/۳۰	۳۳/۰۹	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۸۲	۰/۲۷۸	۳
۱/۰۹	۲/۱۹	۳۱/۱۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۸۴	۰/۳۶۲	۴
۰/۹۰	۱/۸۰	۲۶/۴۹	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۸۰	۰/۴۴۲	۵
۰/۶۷	۱/۳۴	۲۰/۸۶	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۷۴	۰/۵۱۶	۶
۰/۵۴	۱/۰۸	۱۶/۶۹	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۷۴	۰/۵۹۰	۷
۰/۳۵	۰/۷۱	۱۱/۲۹	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۷۱	۰/۶۶۱	۸
۰/۱۳	۰/۲۶	۴/۹۱	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۰۵۷	۰/۷۱۸	۹

جدول ۴- پارامترهای طراحی میراگر ویسکوز غیرخطی در ساختمان ۳ طبقه

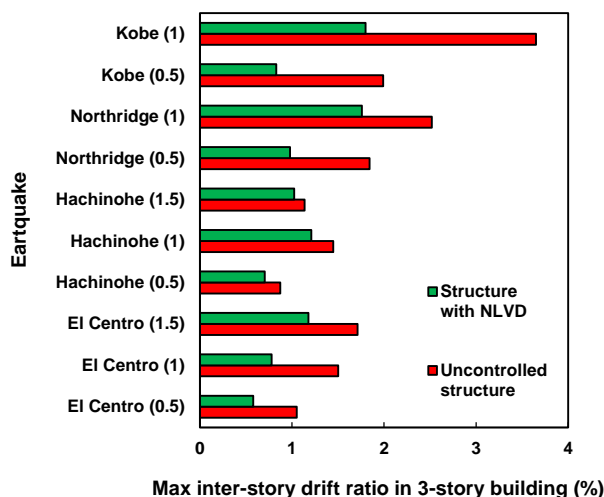
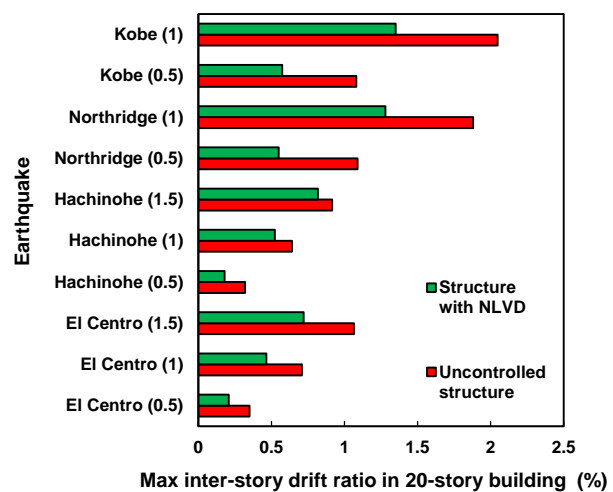
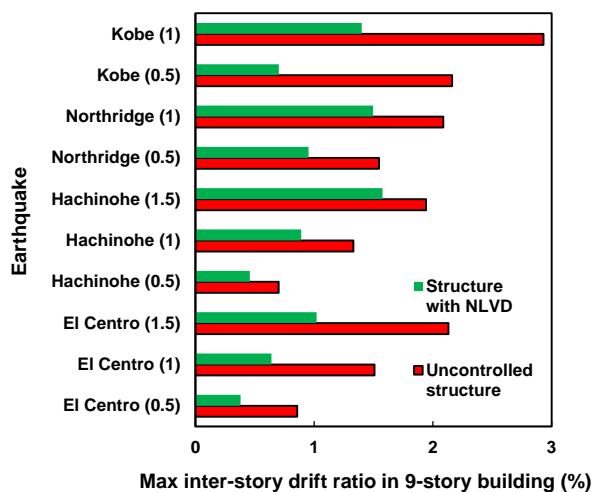
$C_{nd}$ (MN.s <sup><math>\alpha</math></sup> /m <sup><math>\alpha</math></sup> )	$C_{ni}$ (MN.s <sup><math>\alpha</math></sup> /m <sup><math>\alpha</math></sup> )	$C_i$ (MN.s/m)	$\xi_m$ (%)	$\alpha$	گریز مودال، $\varphi_{mi}$	جابجایی مودال، $\varphi_i$	تراز طبقه
۱/۹۹	۳/۹۷	۲۳/۵۷	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۳۲۵	۰/۳۲۵	۱
۰/۴۴۱	۵/۷۴	۲۷/۵۰	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۴۴۱	۰/۷۶۶	۲
۰/۳۸۴	۲/۸۲	۱۴/۸۶	۰/۲۰	۰/۳۰	۰/۳۸۴	۱/۱۵۰	۳

ساختمان‌های فولادی کنترل شده با ساختمان‌های بدون میراگر نشان‌دهنده کاهش چشمگیر در احتمال شکست سازه پس از بهسازی با میراگرهای ویسکوز می‌باشد. همچنین نتایج حاکی از آن است که در مقایسه رفتار سازه با ارتفاع‌های متفاوت، می‌توان گفت که با افزایش ارتفاع، سازه زودتر وارد ناحیه غیرخطی شده و ظرفیت سازه کاهش می‌یابد. به طور کلی با افزایش ارتفاع سازه، آسیب پذیری سازه در همه حالات حدی افزایش می‌یابد ولی نرخ افزایش احتمال خرابی، با افزایش ارتفاع ساختمان کند می‌شود.

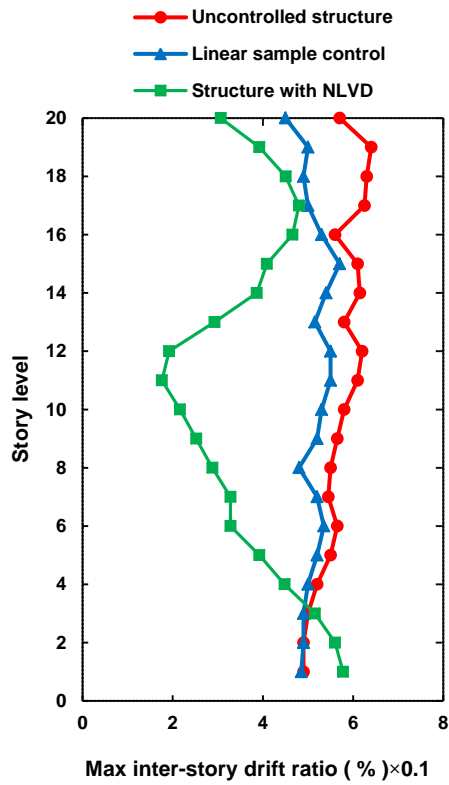
در جدول (۵) ارزیابی اثر بخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های شاخص، با استفاده از رابطه (۲۷) برای ساختمان‌های شاخص (برای  $PGA=1g$ ) ارایه شده است.

قادر به کاهش پاسخ سازه در تمامی طبقات بوده است (به جز طبقه اول ساختمان در زلزله کوبه که با تغییرات موضعی در ظرفیت میراگرها قابل اصلاح می‌باشد). علاوه بر این به دلیل توزیع میراگرهای ویسکوز متناسب با انرژی کرنشی طبقات، در اکثر رکوردها نسبت گریز بین طبقات برای طبقه‌های ۴ تا ۲۰ تقریباً یکسان می‌باشد. وجود این مزیت در طراحی باعث کاهش چشم‌گیر آسیب به سازه در هنگام وقوع زلزله خواهد شد. شایان ذکر است استفاده از روند طراحی جامع منجر به کاهش نسبت گریز بین طبقات (در اکثر طبقات) به زیر ۰/۷ درصد شده است و این بدان معنی است که ساختمان تحت اثر رکورد های اعمال شده در سطح عملکردی IO رفتار خواهد نمود.

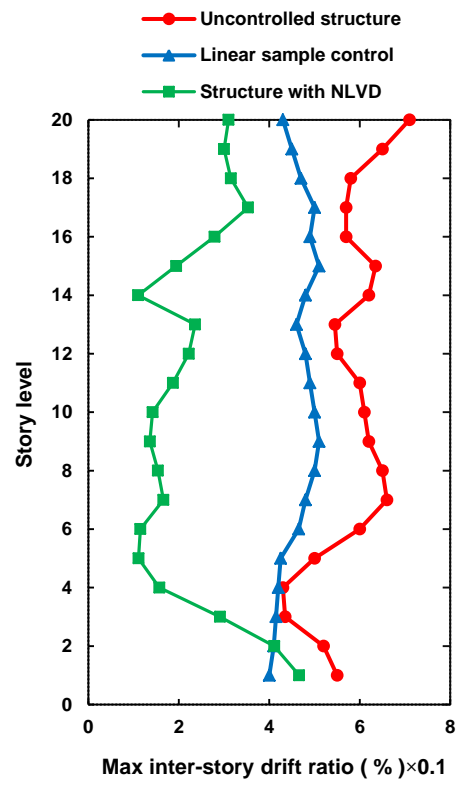
در شکل (۴) منحنی‌های شکنندگی ساختمان‌های مبنا در سه حالت حدی ترسیم شده است. مقایسه منحنی‌های شکنندگی



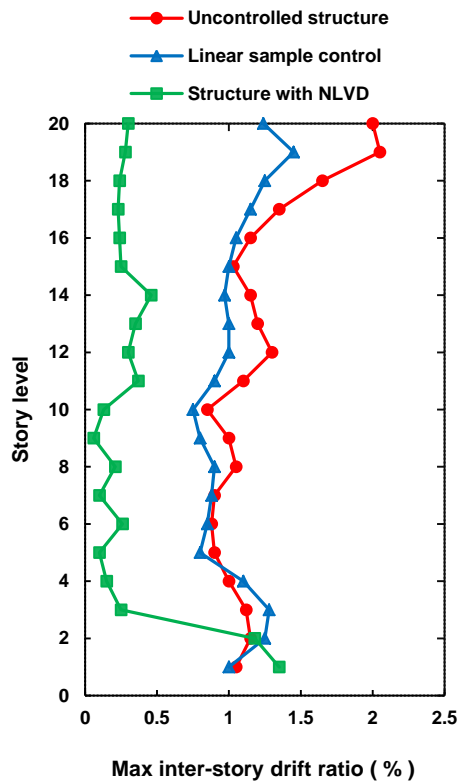
شکل ۲- حداکثر نسبت گریز بین طبقات برای ساختمان‌های شاخص با و بدون میراگر



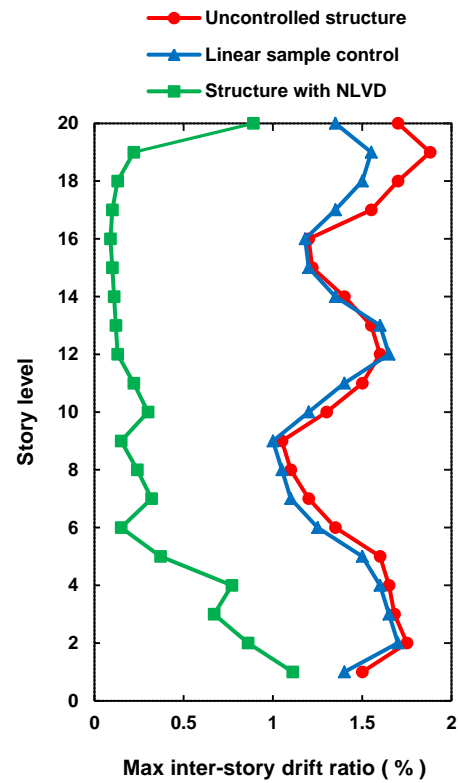
ب) هاچینوهه



الف) السترو

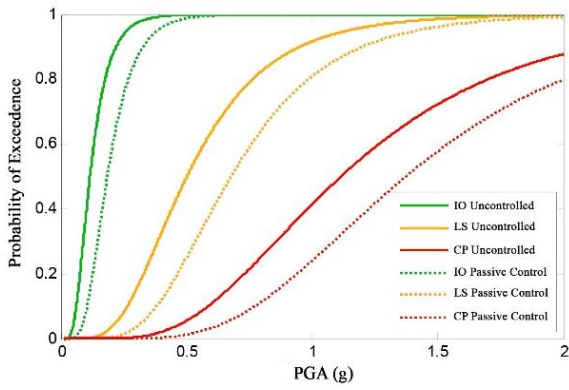


د) کوبه

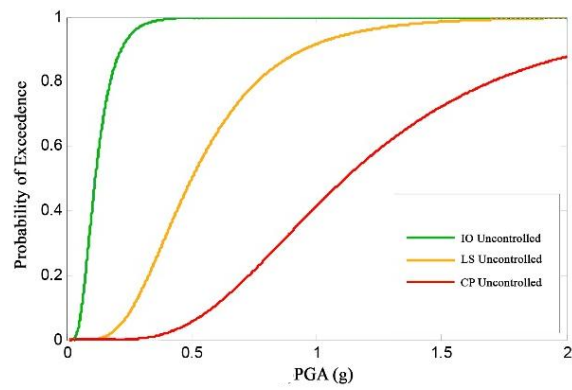


ج) نورتریج

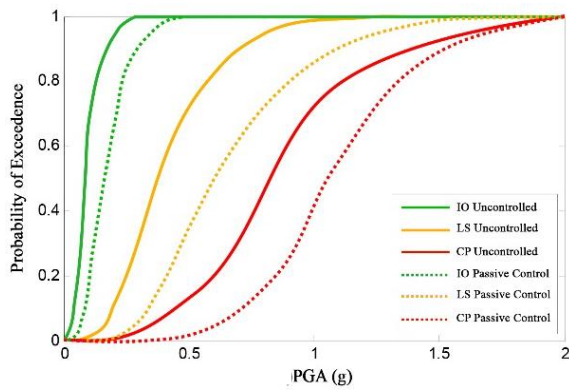
شکل ۳- حداکثر نسبت گریز بین طبقات برای ساختمان ۲۰ طبقه تحت اثر چهار رکورد زلزله



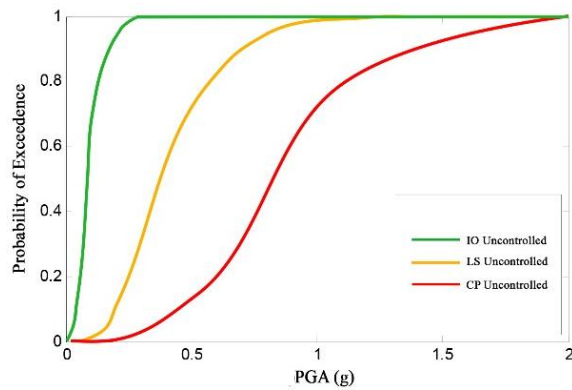
ب) ۳ طبقه



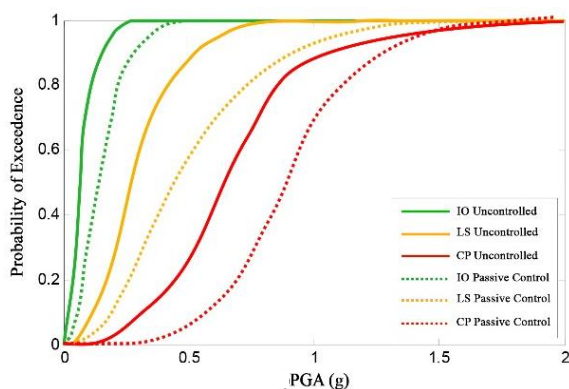
الف) ۳ طبقه



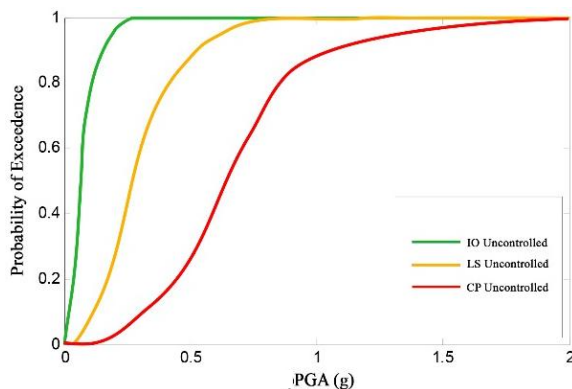
د) ۹ طبقه



ج) ۹ طبقه



و) ۲۰ طبقه



ه) ۲۰ طبقه

شکل ۴- منحنی‌های شکنندگی برای سازه‌های شاخص با و بدون میراگر

جدول ۵- ارزیابی میزان اثربخشی بهسازی لرزه‌ای با استفاده از میراگرهای ویسکوز در ساختمان‌های شاخص

EFF (%)	$P_{Before}^{CP}$	$P_{After}^{LS} + P_{After}^{CP}$	$P_{Before}^{LS} + P_{Before}^{CP}$	$\Delta_{LS1}$	$\Delta_{After}^{max}$	$\Delta_{Before}^{max}$	ساختمان مبنا
۴۵/۲۸۷۱	۰/۴۴	۱/۰۷	۱/۳۷	۰/۷	۱/۳۸۸	۲/۲۸۱	۳ طبقه
۴۷/۹۸۱۰	۰/۷۳	۱/۳۰	۱/۷۱	۰/۷	۱/۱۰۶	۱/۹۶۴	۹ طبقه
۴۱/۳۸۷۰	۰/۸۹	۱/۶۱	۱/۸۹	۰/۷	۰/۹۰۴	۱/۳۱۹	۲۰ طبقه

the nonlinear behavior of viscous dampers on the seismic demand hazard of building frames", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 45, pp. 149-169.

- [5] Chopra, A.K. and McKenna, F. (2016), "Modeling viscous damping in nonlinear response history analysis of buildings for earthquake excitation", *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 45, pp. 193-211
- [6] Hwang, J.-S., Lin, W.-C. and Wu, N.-J. (2013), "Comparison of distribution methods for viscous damping coefficients to buildings", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 9, pp. 28-41.
- [7] Whittle, J., Williams, M., Karavasilis, T.L. and Blakeborough, A. (2012), "A comparison of viscous damper placement methods for improving seismic building design", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 16, pp. 540-560.
- [8] Sorace, S., Terenzi, G. and Mori, C. (2016), "Passive energy dissipation-based retrofit strategies for R/C frame water towers", *Engineering Structures*, Vol. 106, pp. 385-398.
- [9] Guo, T., Xu, J., Xu, W. and Di, Z. (2014), "Seismic upgrade of existing buildings with fluid viscous dampers: Design methodologies and case study", *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 29, 40141.
- [10] Banazadeh, M., Gholhaki, M. and Parvini Sani, H. (2017) "Cost-benefit analysis of seismic-isolated structures with viscous damper based on loss estimation", *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol. 13, pp. 1045-1055.
- [11] Gidaris, I. and Taflanidis, A.A. (2015), "Performance assessment and optimization of fluid viscous dampers through life-cycle cost criteria and comparison to alternative design approaches", *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 13, pp. 1003-1028.
- [12] Seleemah, A. and Constantinou, M.C. (1997), "Investigation of seismic response of buildings with linear and nonlinear fluid viscous dampers", Report number: NCEER-1997-0004, National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, New York, USA.
- [13] Sorace, S. and Terenzi, G. (2008), "Seismic protection of frame structures by fluid viscous damped braces", *Journal of structural engineering*, Vol. 134, pp. 45-55.
- [14] Blandon, C.A. and Priestley, M. (2005), "Equivalent viscous damping equations for direct displacement based design", *Journal of earthquake Engineering*, Vol. 9, pp. 257-278.
- [15] Sullivan, T. and Lago, A. (2012), "Towards a simplified direct DBD procedure for the seismic design of moment resisting frames with viscous dampers", *Engineering Structures*, Vol. 35, pp. 140-48.
- [16] Hwang, J.-S., Huang, Y.-N., Yi, S.-L. and Ho, S.-Y. (2008), "Design formulations for supplemental viscous dampers to building structures, *Journal of structural engineering*", Vol. 134, pp. 22-31.
- [17] Fu, Y. and Kasai, K. (1998), "Comparative study of frames using viscoelastic and viscous dampers", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 124, pp. 513-522.
- [18] Lee, D. and Taylor, D.P. (2001), "Viscous damper development and future trends", *The Structural Design of Tall and Special Buildings*, Vol. 10, pp. 311-320.

[۱۹] باغبان، ا.، اکرم‌الدین، ع. و حاجی کاظمی، ح. (۱۳۹۳)، "تحلیل شکنندگی لرزه‌ای برای ساختمان‌های کنترل شده"، هشتمین کنگره مهندسی عمران.

همان گونه که در جدول (۵) مشاهده می‌شود اگرچه بهسازی لرزه‌ای در همه ساختمان‌های شاخص منجر به بهبود عملکرد لرزه‌ای شده است، اما میزان کاهش احتمال خرابی در سازه نه طبقه بیشتر از سایر ساختمان‌ها می‌باشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

خسارات ناشی از زلزله‌های به وقوع پیوسته در سال‌های اخیر نیاز به طراحی بر مبنای عملکرد و بهسازی لرزه‌ای ساختمان‌های موجود را آشکار می‌سازد. یکی از روش‌های موثر در بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها استفاده از میراگرهای ویسکوز غیر خطی می‌باشد. در این تحقیق با هدف دستیابی به یک روند طراحی جدید برای مهندسين طراح حرفه‌ای جهت بررسی اثربخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای سازه‌های فولادی، یک روند طراحی جامع جهت بهسازی لرزه‌ای سازه‌ها با استفاده از تحلیل شکنندگی لرزه‌ای ارائه شده است. در این روند طراحی جامع اثر عدم قطعیت در ارزیابی بهسازی لرزه‌ای ساختمان لحاظ می‌گردد و همچنین میزان اثر بخشی استفاده از میراگرهای ویسکوز در بهسازی لرزه‌ای با ارایه یک فرمول پیشنهادی ساده و کاربردی، صورت می‌پذیرد.

در روند طراحی پیشنهادی از نسبت گریز بین طبقات به عنوان شاخص خرابی و از PGA به عنوان پارامتر شدت زلزله استفاده شده است. نتایج تحلیل مدل‌های عددی نشان داد که روند پیشنهادی قادر به کاهش پاسخ سازه‌ها و بهبود عملکرد آنها می‌باشد به نحویکه میزان اثر بخشی آن در ساختمان‌های شاخص ۳، ۹ و ۲۰ طبقه به ترتیب ۴۵، ۴۸ و ۴۱ درصد می‌باشد. همچنین نتایج عددی نشان داد اگرچه بهسازی لرزه‌ای در همه ساختمان‌های شاخص منجر به بهبود عملکرد لرزه‌ای شده است، ولی روند طراحی جامع پیشنهادی در بهبود عملکرد سازه‌های میان مرتبه موثرتر است.

## ۷- مراجع

- [1] Shin, H. and Singh, M. (2014), "Minimum failure cost-based energy dissipation system designs for buildings in three seismic regions-Part I: Elements of failure cost analysis", *Engineering Structures*, Vol. 74, pp. 266-274.
- [2] Kitayama, S. and Constantinou, M.C. (2018), "Seismic performance of buildings with viscous damping systems designed by the procedures of ASCE/SEI 7-16", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 144, 04018050.
- [3] Silvestri, S., Gasparini, G. and Trombetti, T. (2010), "A five-step procedure for the dimensioning of viscous dampers to be inserted in building structures", *Journal of Earthquake Engineering*, Vol. 14, pp. 417-447.
- [4] Dall' Asta, A., Tubaldi, E. and Ragni, L. (2016), "Influence of



[۲۰] قادری، د. و ناصراسدی، ک. (۱۳۹۴)، "مطالعه تاثیر نوع خاک در برآورد منحنی های شکنندگی تحلیلی قاب های خمشی بتنی کوتاه با شکل پذیری متوسط"، علوم و مهندسی زلزله، سال دوم، ص. ۱۲-۱.

[21] Ohtori, Y., Christenson, R., Spencer Jr, B. and Dyke, S. (2004), "Benchmark control problems for seismically excited nonlinear buildings, Journal of Engineering Mechanics", Vol. 130, pp. 366-385.

[22] Somerville, P. and Collins, N. (2002), "Ground motion time histories for the Humboldt Bay bridge", Pasadena, CA, URS Corporation.

[23] Bommer, J.J., Elnashai, A.S. and Weir, A.G. (2000), "Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes", Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, pp. 1-8.

[24] Shinozuka, M., Feng, M.Q., Lee, J. and Naganuma, T. (2000), "Statistical analysis of fragility curves", Journal of engineering mechanics, Vol. 126, pp. 1224-1231.

[25] Dimova, S.L. and Hirata, K. (2000), "Simplified seismic fragility analysis of structures with two types of friction devices", Earthquake engineering & structural dynamics, Vol. 29, pp. 1153-1175.

[26] Karim, K.R. and Yamazaki, F. (2003), "A simplified method of constructing fragility curves for highway bridges", Earthquake engineering and structural dynamics, Vol. 32, pp. 1603-1626.

[۲۷] ناصری، ع.، پهلوان، ح. و قدرتی امیری، غ.ر. (۱۳۹۶)، "ارزیابی احتمالاتی خسارات لرزه ای سازه های بتن آرمه شمال ایران با استفاده از منحنی های شکنندگی"، مهندسی سازه و ساخت، سال چهارم، ص. ۷۸-۵۸.

